

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

THAIZA KARINE PEREIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PLANEJAMENTO FLORESTAL OTIMIZADO DE PLANTIOS DE
EUCALYPTUS SPP. CONSIDERANDO BLOCOS ANUAIS DE COLHEITA**

CURITIBA

2016

THAIZA KARINE PEREIRA

PLANEJAMENTO FLORESTAL OTIMIZADO DE PLANTIOS DE
EUCALYPTUS SPP. CONSIDERANDO BLOCOS ANUAIS DE COLHEITA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Florestal, Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná, como
requisito para a conclusão da disciplina
ENGF006 e requisito parcial obtenção de
título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

CURITIBA

2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e à minha tia Soeli que sempre depositaram muita confiança em mim, me apoiando em todas as etapas da minha vida pessoal e acadêmica, compartilhando comigo as minhas conquistas.

Aos meus amigos, pela paciência e compreensão para comigo durante a época de elaboração deste trabalho.

Aos meus gestores no estágio André e Davi, e demais colegas da empresa WestRock que aceitaram a minha proposta de trabalho, me forneceram os dados e me co-orientaram para que este TCC pudesse ser realizado.

Ao Edgar Krast, que me “socorreu” em alguns momentos na elaboração deste trabalho.

E em especial, agradeço ao Professor Julio Arce, pela confiança em ter aceitado o meu convite e ter me dado a honra de fazer parte do seu grupo de orientados; pela paciência e atenção em responder aos meus vários e-mails e me receber em sua sala para as orientações presenciais; pela oportunidade de me situar em uma parte da ciência da pesquisa operacional; e claro pelos conhecimentos e ensinamentos compartilhados durante este primeiro semestre de 2016 e em todas as aulas por ele ministradas durante a graduação de Engenharia Florestal.

RESUMO

A grande preocupação das empresas florestais é garantir uma sustentabilidade em nível de produção e nos aspectos ambientais, sociais e econômicos. Isso pode ser obtido em meio ao manejo adequado projetado por um planejamento florestal otimizado, que avalia todas as informações pertinentes ao negócio e resulta em uma solução ótima, ou seja, o melhor resultado possível para o objetivo estabelecido. A etapa que mais requer atenção no planejamento é a colheita florestal, pois é nela que são refletidos todos os investimentos de manejo na forma de produto final, incluindo ainda todos os custos relacionados à essa atividade, como transporte de máquinas, deslocamento de pessoas, frete, manutenção de estradas, entre outros. Dentro dos níveis de planejamento, o planejamento tático é o que melhor auxilia nas tomadas de decisões operacionais da colheita. Diante dessa relevância, objetivou-se neste trabalho elaborar um planejamento tático otimizado da colheita florestal de plantios de *Eucalyptus spp.* visando a operacionalização para os próximos 5 anos. Foi usado um banco de dados com 364 talhões pertencentes a 40 fazendas, equivalendo a uma área de 4.460,88 hectares localizada nos Estados do Paraná e de Santa Catarina, sendo que cada talhão completa uma tabela de produção com os dados de inventário, como idade, projeção de volume, densidade de plantio, índice de sítio, entre outros, que ao final deverão resultar em arranjos na colheita que satisfaçam a parcial demanda anual por madeira da fábrica que seja viável operacionalmente. Assim, foram propostos quatro cenários, pertencentes a quatro modelos matemáticos diferentes, gerenciados e processados pelo software OpTimber-LP no computador do Laboratório de Manejo Florestal da UFPR. Os modelos matemáticos são embasados no Modelo Tipo I e os problemas se enquadram nos modelos de Programação Linear Inteira e de Programação Linear Inteira Mista, resolvidos pelo Algoritmo *Branch-and-Bound*. Todos os cenários atingiram a solução ótima. Com relação à produção, o 1º cenário obteve a melhor resposta, seguido do 2º cenário, mas ambos não se mostraram operacionalmente viáveis por conta do agendamento da colheita. Já o 3º e o 4º cenário, mesmo representados por funções objetivos diferentes, resultaram na mesma produção ao longo do horizonte de planejamento, sendo considerados satisfatórios em nível operacional. Por uma questão de distâncias médias, o 3º cenário foi o que melhor respondeu ao problema deste trabalho.

Palavras chaves: planejamento tático, blocos de colheita, otimização.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS MACIÇOS DE FLORESTAS PLANTADAS POR ESTADO, 2013.....	14
FIGURA 2 - FASES DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA OPERACIONAL	21
FIGURA 3 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
FIGURA 4 – AGENDAMENTO ESPACIAL DOS TALHÕES NO CENÁRIO 1 .	38
FIGURA 5 – AGENDAMENTO ESPACIAL DOS TALHÕES NO CENÁRIO 2 .	40
FIGURA 6 – AGENDAMENTO ESPACIAL DOS TALHÕES NO CENÁRIO 3 E 4	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONSUMO BRASILEIRO DE MADEIRA IN NATURA PARA USO INDUSTRIAL POR SEGMENTO E GÊNERO, 2013	13
TABELA 2 – PRODUÇÃO ANUAL SUSTENTÁVEL DE MADEIRA DE <i>EUCALYPTUS SPP.</i> NOS 5 ANOS DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO .	28
TABELA 3 - ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DE <i>EUCALYPTUS SPP.</i> DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA	29
TABELA 4 - VARIÁVEIS, CONSTANTES E ÍNDICES DOS MODELOS MATEMÁTICOS	30
TABELA 5 - RESUMO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS.....	34
TABELA 6 - RESULTADOS DOS CENÁRIOS PROPOSTOS	36
TABELA 7 - RESULTADOS DE PRODUÇÃO ANUAL PARA CADA CENÁRIO DO HP.....	36
TABELA 8 - AGENDA DA FAZENDA PAREDÃO NO CENÁRIO 1.....	37
TABELA 9 - AGENDA DA FAZENDA PAREDÃO NO CENÁRIO 2.....	39
TABELA 10 - AGENDA DA ÁREA DE ESTUDO PARA OS CENÁRIOS 3 E 4 continua.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - DISTÂNCIA MÉDIA DE TRANSPORTE PONDERADA DA COLHEITA ATÉ A FÁBRICA DE PAPEL PARA O CENÁRIO 3	43
GRÁFICO 2 - DISTÂNCIA MÉDIA DE TRANSPORTE PONDERADA DA COLHEITA ATÉ A FÁBRICA DE PAPEL PARA O CENÁRIO 4	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3.2 Planejamento Florestal	16
3.3 Colheita Florestal	18
3.4.1 Programação Linear	22
3.4.2 Programação Linear Inteira e Programação Linear Inteira Mista	25
4.2 O Problema	27
4.3 O Modelo de Otimização	29
4.3.1 Função Objetivo	31
4.3.2 Restrições	31
4.4 Os Cenários	33
4.5 Recursos Computacionais	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6 CONCLUSÕES	44
7 RECOMENDAÇÕES	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

As empresas florestais vêm se preocupando cada vez mais com a sustentabilidade da atividade, fundamentada em valores ambientais, sociais e econômicos. Isso porque a atividade florestal está em contato direto e constante com os recursos naturais e com a sociedade dos arredores das regiões de plantio, questões essas muito sensíveis atualmente, necessitando atender ainda uma demanda por produtos florestais, mantendo o setor competitivo no mercado.

Contudo, para a obtenção do máximo retorno econômico e produtivo, é fundamental que a floresta atinja uma estabilidade de produção que pode ser oriundo de um manejo sustentável, que é cada vez mais requisitado no planejamento da produção florestal. E o planejamento florestal é cobrado por eficiência e detalhamento, em decorrência do tempo necessário para a implantação, maturação e colheita final da floresta (FIORENTIN, 2016).

A colheita florestal já foi considerada por muitas empresas como o gargalo da produção, pois mesmo que nessa etapa se obtenha um retorno e lucro do capital investido, é também nessa etapa que se concentram altos custos da cadeia produtiva. De acordo com ZAGONEL (2005), a colheita e o transporte de madeira são atividades que podem representar aproximadamente 70 % dos custos da matéria prima (madeira) influenciando diretamente no valor final. Por isso, essa etapa entra em destaque no processo de produção florestal e consequentemente no planejamento, pois esta deve ocorrer de forma que a agenda de corte dos talhões atenda as metas de produção com bom rendimento operacional, atendendo às exigências ambientais, sociais e econômicas.

Dentro dos parâmetros que conferem um bom rendimento operacional na colheita florestal estão a produtividade e a dispersão dos talhões a serem colhidos, que considera o deslocamento da(s) frente(s) de colheita (máquinas, funcionários, manutenção, etc.) e o frete do transporte da madeira (SILVA, 2015). E para a elaboração de um plano de colheita que atenda a todos esses quesitos da melhor maneira possível, é necessária uma série de informações

em nível de unidade de manejo, como: crescimento e produção da floresta, distribuição espacial dos talhões, rendimento operacional, rede de estradas, idade de plantio dos talhões, etc.. Diante dessa quantidade de fatores a serem considerados no planejamento, AUGUSTYNCZIK (2014) diz que para alcançar os objetivos estabelecidos e obter um retorno satisfatório sobre o investimento, é necessário realizar um manejo florestal adequado com o auxílio de uma importante ferramenta à tomada de decisões: A Programação Linear.

A Programação Linear (PL) é uma ferramenta matemática de otimização, que pode ser aplicada em vários tipos de problemas que envolvem planejamento, sendo notadamente relevante no planejamento da colheita florestal (AUGUSTYNCZIK, 2014). Essa ferramenta matemática permite gerar cenários para um problema, fornecendo informações importantes para apoiar as tomadas de decisões.

Quando o planejamento florestal requer representar as unidades de manejo de forma íntegra, incorporando restrições espaciais e operacionais, usam-se algoritmos dos modelos de otimização da Programação Linear Inteira Mista (PLIM), que consiste em estabelecer uma agenda de corte das unidades de manejo envolvendo a distância entre elas, horizonte de planejamento e produção, objetivando geralmente maximizar os lucros atendendo a uma demanda volumétrica especificada, bem como aumentar a eficiência das operações.

É graças a essas ferramentas que o presente trabalho se propôs a organizar a colheita de plantios de *Eucalyptus spp.* na elaboração um planejamento tático otimizado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar o planejamento tático florestal otimizado da colheita das áreas de plantio de *Eucalyptus spp.* em um horizonte de planejamento de cinco anos.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as restrições e as funções objetivos para o planejamento otimizado da colheita;
- Gerar cenários com diferentes restrições e funções objetivo;
- Avaliar os diferentes cenários em nível operacional;
- Avaliar o impacto na redução do volume de produção que a floresta consegue fornecer sob várias condições de restrições e funções objetivo;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 *Eucalyptus* spp. no Brasil

O gênero *Eucalyptus* reúne mais de 600 espécies diferentes e hoje é uma das principais fontes de matéria-prima para produzir papel e celulose. Mesmo sendo originário da Austrália e da Indonésia, o eucalipto encontrou ótimas condições de clima e solo no Brasil, se desenvolvendo bem, com alto índice de produtividade e crescendo mais rápido que no seu habitat natural. As principais espécies cultivadas no Brasil são: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus dunnii*.

Os primeiros eucaliptos chegaram ao Brasil como planta ornamental em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Quarenta e três anos depois, no Rio Grande do Sul, a espécie começou a ser plantada para a produção de lenha e formação de barreiras contra o vento. Só nos primeiros anos do século XX é que começou a expansão do cultivo de eucalipto, graças aos estudos do silvicultor brasileiro Edmundo Navarro de Andrade, que promoveu o plantio de árvores de eucalipto para outras finalidades. Mas no segmento papeleiro, a produção intensiva do eucalipto para a produção de celulose de fibra curta se deu por volta de 1957, na fabricação de guardanapos, papel higiênico, papéis para imprimir e escrever, entre outros (BRACELPA, 2009).

Além da produção de celulose, o eucalipto também é fonte de carvão vegetal para gerar energia e de madeira sólida para móveis, pisos e outras aplicações estruturais. No entanto, a madeira de eucalipto utilizada como madeira sólida apresenta, de modo geral, características tecnológicas consideradas inapropriadas, apresentando rachaduras e empenamentos.

De acordo com os dados da IBÁ (2014), o consumo de madeira *in natura* de eucalipto para uso industrial é de 138.246.903 m³ por ano. A TABELA 1 mostra os valores por segmento e gênero da área industrial florestal.

TABELA 1 - CONSUMO BRASILEIRO DE MADEIRA IN NATURA PARA USO INDUSTRIAL POR SEGMENTO E GÊNERO, 2013

Segmento	Consumo de Madeira <i>in natura</i> (m ³)			
	Eucalipto	Pinus	Outras	Total
Celulose e papel	56.628.357	8.067.258	498.085	65.193.700
Painéis de madeira	6.428.162	13.457.258	378.612	20.264.031
Serrados e outros produtos sólidos	6.870.498	15.295.499	357.052	22.523.049
Carvão	23.533.724	-	-	23.533.724
Lenha industrial	41.832.528	3.929.361	4.262.239	50.024.128
Madeira tratada	1.824.012	-	-	1.824.012
Cavaco de madeira e outros	1.129.621	-	781.200	1.910.821
Total	138.246.903	40.749.376	6.277.187	185.273.466

FONTE: IBÁ (2014) adaptado pelo AUTOR (2016)

Atualmente, as florestas plantadas com eucalipto cobrem 6.951.145 hectares no Brasil, o que corresponde a 74% de toda a área de florestas plantadas no país (SNIF, 2015). Aproximadamente 82% das florestas de eucalipto são cultivadas pela indústria de celulose e papel (ABRAF).

No Brasil, o Incremento Médio Anual (IMA) das florestas de eucalipto oscila entre 30 a 42 m³ ha⁻¹. ano⁻¹ (ACR, 2014). A espécie leva aproximadamente sete anos até ser colhida, podendo ser cultivada em terrenos de baixa fertilidade natural, embora não tolere solos rasos e excesso de água (BRACELPA, 2011).

No âmbito ambiental, há muitas controvérsias sobre o seu benefício ao ecossistema local, por se tratar de uma monocultura de espécie exótica. Porém, graças ao plantio de eucalipto cultivado em grande escala é que as florestas nativas estão sendo preservadas e, por conta do interesse das grandes empresas nos selos de certificação de sustentabilidade, há uma forte

pressão para que haja desenvolvimento social e conservação ambiental nas regiões de produção florestal.

3.1.1 *Eucalyptus spp.* e as florestas plantadas no Estado do Paraná e Santa Catarina

Paraná e Santa Catarina são estados brasileiros em que a atividade florestal tem grande importância, econômica, social e ambiental. Como grandes polos madeireiros, principalmente no ramo de madeira serrada, laminados e móveis, os estados demandam uma grande quantidade de matéria-prima e, graças às condições edafoclimáticas, favoreceram-se a expansão em grande escala de florestas pinus e eucalipto com altos níveis de produtividade. A FIGURA 1 ilustra a distribuição dos maciços de florestas plantadas no Brasil em 2013.

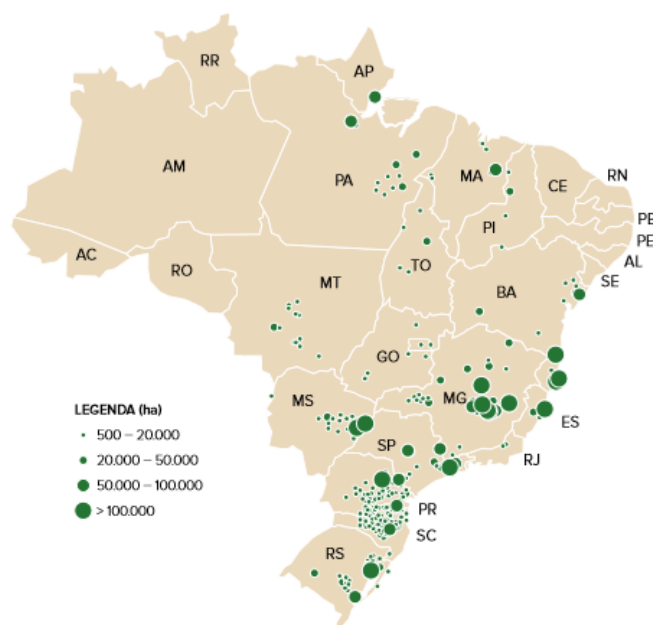


FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS MACIÇOS DE FLORESTAS PLANTADAS POR ESTADO, 2013.

FONTE: ACR (2014)

No Estado do Paraná, as áreas de plantios florestais são 1.066.479 hectares, equivalente a aproximadamente 5,4% da área do estado. Dessas áreas, mais de 660.000 hectares são de plantios de pinus, conferindo ao Estado a posição de primeiro lugar em produção de pinus do país e, com cerca de 200.000 hectares as áreas de plantio de eucalipto representam 34,2% da área total plantada do Estado (EISFELD & NASCIMENTO, 2015).

De acordo EISFELD & NASCIMENTO no Mapeamento dos Plantios Florestais do Paraná de 2015, os plantios de pinus encontram-se mais concentrados espacialmente no território paranaense, sendo comportado aproximadamente 94% de todo o plantio de pinus na região Centro-Sul. Já o eucalipto, mesmo não sendo tão numeroso quanto o pinus, é muito melhor distribuído, apresentando plantios por todo o estado.

O Estado de Santa Catarina também apresenta um maior número de plantios de pinus do que de eucalipto, ocupando o segundo lugar na categoria de produção de pinus e ficando cinco posições atrás do Estado do Paraná na produção de eucalipto no país (PR – 8º; SC – 13º). Ao todo são 646.000 hectares de florestas plantadas no Estado, sendo aproximadamente 540.000 ha de pinus e 106.000 ha de eucalipto.

Entretanto, as florestas plantadas no estado de Santa Catarina, tanto pinus quanto eucalipto, tem um nível de produtividade maior que a média nacional, o que representa a potencialidade do Estado para o setor florestal brasileiro. Para o Pinus, a média nacional do IMA é de 25 a 35 m³ ha⁻¹.ano⁻¹, e para o eucalipto é de 30 a 42 m³ ha⁻¹.ano⁻¹; Santa Catarina apresenta para pinus e eucalipto um IMA de 44 e 40 m³ ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente (ACR, 2014).

Segundo a ABRAF (2013), desde 2006, o Estado de Santa Catarina vem desacelerando o ritmo de crescimento das áreas de plantios de pinus, ampliando a área de plantio de eucalipto em 8% ao ano, seguindo uma tendência nacional. Isso, segundo CASTANHO F^o (2006), se deve ao fato de que o setor mais organizado dentro do agronegócio florestal brasileiro, Celulose e Papel, é o que mais cresce em nível mundial e que demanda a matéria-prima do eucalipto para a qualidade do produto que requerem os fabricantes e clientes, sendo o Brasil o maior produtor da chamada “celulose de fibra curta de mercado” no ranking mundial.

3.2 Planejamento Florestal

O planejamento florestal é um processo que envolve grandes empresas, grande número de pessoas, extensas áreas florestais e uma diversidade de atividades, onde de tudo isso serão levantadas questões importantes em longo prazo, como a sustentabilidade dos recursos florestais e do fluxo constante de madeira, e em curto prazo, que são questões relacionadas ao acesso aos talhões e à rede viária. Além dessas questões, são consideradas no planejamento a utilização dos maquinários e a alocação desses nas áreas de colheita (ANDERSSON, 2005).

De modo geral, o planejamento florestal é realizado de forma que os povoamentos florestais obtenham um máximo retorno econômico, respeitando os fatores sociais e ambientais dentro de um horizonte de planejamento. Uma das atividades mais críticas que estão inseridas no planejamento de uma empresa seria a colheita florestal, pois nela devem ser tomadas decisões que envolvam grandes áreas florestais com os povoamentos divididos em um grande número de talhões, de forma que haja um melhor agrupamento possível para que as áreas sejam colhidas em uma mesma época, reduzindo custos como, por exemplo, do deslocamento das frentes de colheita. Entretanto, essas decisões não podem ser tomadas de forma rápida, sendo conveniente e quase necessário o uso dos métodos computacionais para alcançar a otimização deste agrupamento, verificando que se a área destinada para corte for muito pequena, o deslocamento da frente de colheita até esta área não será compensatório, e se a área for muito grande a limitação poderá ser baseada em aspectos ambientais, regulamentando a extensão de floresta que podem ser colhidas naquele período diante das exigências legais (JASKIU, 2015).

Segundo SCHNEIDER (2009), o planejamento faz uma comparação entre a situação atual e a situação desejada, traçando a partir daí as estratégias para a execução das atividades, ordenando e organizando-as dentro de um determinado período do tempo, visando atingir a meta econômica.

ANDERSSON (2005) diz que há três fases de planejamento que seguem uma hierarquia na área florestal. O mais amplo é o planejamento estratégico,

que é realizado visando a obtenção de níveis de colheita sustentáveis, respeitando a legislação. Dentro do planejamento estratégico tem-se o planejamento tático, que objetiva programar colheitas em áreas específicas em uma escala de tempo menor que planejamento estratégico. Por último tem-se o planejamento operacional, que trata do gerenciamento dos trabalhadores e máquinas semanalmente ou mensalmente. MCDILL (2014) complementa que, como o planejamento ocorre em diferentes níveis e com diferentes graus de detalhamento, é preciso que haja interação entre os níveis de planejamento, ainda que o mesmo possa ser feito de forma independente.

No planejamento estratégico, as decisões são relacionadas à sustentabilidade do empreendimento por meio da definição de metas volumétricas de colheita em longo prazo, da potencialidade das espécies, das classes de idade da floresta futura, e dos tipos de produtos. Devido à grande amplitude em termos de superfície florestal e horizonte de planejamento (comumente acima de dez anos), nem sempre se torna viável incluir a relação espacial entre as unidades de manejo, rede de estradas, entre outros (ANDERSSON, 2005; MCDILL, 2014; WEINTRAUB, 1996). Para BETTINGER (2009), os aspectos espaciais dos planos de manejo são geralmente ignorados no planejamento estratégico.

No planejamento tático, assuntos relacionados à localização espacial e temporal das atividades de manejo são reconhecidos e tratados. O horizonte de planejamento é em torno de cinco anos, dividido em períodos anuais ou mensais, de acordo com os objetivos delineados (CHURCH, R. L. et al., 1998; BASKENT E KELES, 2005; MCDILL, 2014). Ao contrário do planejamento estratégico, a relação espacial entre os talhões é um importante aspecto em nível tático, pois aí se tem o conhecimento de quais são as barreiras físicas de deslocamento das frentes de colheita na floresta ou ambientais que podem comprometer alguma tomada de decisão.

O planejamento tático pode ser dividido em duas estruturas: macroplanejamento e microplanejamento. Cabe ao macroplanejamento levantar e caracterizar os talhões considerados aptos para serem colhidos nos períodos determinados, verificando se há necessidade de investimentos e adequação da estrutura operacional existente. Ao microplanejamento cabem as análises do interior dos talhões, onde se verifica a necessidade de algumas

ações em locais específicos para possibilitar a colheita, norteadas pela execução das estratégias do planejamento tático operacional de curto prazo (GUIMARÃES, 2004).

No nível mais baixo da hierarquia está o planejamento operacional, planejamento este que abrange horizontes de tempos curtos, variando de períodos inferiores à uma semana até em torno de um ano. O planejamento operacional trata das atividades que são realizadas pelas equipes de trabalho e maquinário existente, gerenciando os sistemas de colheita, transporte e a entrega dos produtos específicos aos clientes finais (MITCHEL, 2004). Talvez o maior desafio do nível operacional seja a tomada de decisões oriundas dos imprevistos, sendo muito deles causados pelas variações ambientais periódicas.

O planejamento florestal deve englobar e relacionar todas as variáveis encontradas no manejo florestal, que seriam biológicas (potencial de crescimento da espécie), econômicas (preço da madeira), e sociais (leis ambientais e termos de ajustamento de conduta). Devido a essa complexidade, as técnicas de pesquisa operacional se tornam importantes ferramentas de auxílio na elaboração do planejamento, obtendo-se assim um manejo florestal adequado.

3.3 Colheita Florestal

Segundo ARCE et al. (2004), citado por AUGUSTYNICZIK (2014), a colheita representa a operação final de um ciclo de produção florestal, de onde se obtêm os produtos mais valiosos, constituindo um dos fatores que determinam a rentabilidade florestal.

No abastecimento de indústrias de base florestal com madeira advinda de plantações, os equipamentos de colheita são influenciados pela demanda da indústria por meio do tipo de produto, qualidade, sortimento e quantidade a ser produzida. Quanto aos produtos, estes podem ser divididos em macroprodutos e cavacos. Os macroprodutos seriam as toras com e sem casca, destinados à serraria, laminação ou celulose, e os cavacos são a madeira

picada que são destinados à produção de energia e celulose. Quanto a qualidade do produto, seja para madeira em tora ou cavaco, a colheita para celulose é a que apresenta níveis mais baixos de tolerância para o percentual de cascas e resíduos de solo e outros contaminantes (ROBERT, 2012).

De acordo com o beneficiamento da madeira no campo em função da especificação do cliente, é determinado um sistema de colheita adequado, sendo composto por equipamentos que podem atuar na derrubada, arraste, desgalhamento, carregamento, baldeio e até descascamento, dependendo do arranjo do sistema produtivo de uma indústria. De acordo com ROBERT (2012), os aspectos que influenciam o dimensionamento de equipamentos na colheita florestal seriam: a espécie plantada, o relevo, o clima, o volume de madeira por unidade de área, o volume de madeira por indivíduo, o regime silvicultural, o alinhamento de plantio, a densidade de estradas e o talhamento.

As operações da colheita florestal devem ser planejadas com bastante antecedência devido aos custos de equipamentos e mão-de-obra, localização e topografia das áreas florestais e da infraestrutura de apoio. De posse dessas informações, os locais específicos para colheita são selecionados e demarcados, por meio de planejamento, conforme o plano de manejo florestal, sistema de transporte, terreno e a escala operacional desejada, considerando a minimização dos custos, otimização dos rendimentos e a redução de impactos ambientais (MACHADO, 2006).

GOMIDE (2009) considera o agendamento da colheita um problema do planejamento florestal, onde são envolvidas diversas opções de manejo, representada pelas variáveis de decisão do modelo matemático. O problema significa estabelecer uma agenda de colheita para um período de tempo predefinido, através da seleção de talhões presentes nas áreas florestais. Ainda dentro deste problema, WALTERS (1996) aponta outra questão fundamental: a formação de blocos de colheita. O tamanho, a localização e o período de colheita dos talhões afeta diretamente o desenvolvimento e estrutura da floresta. Entretanto, devem ser consideradas as áreas de abertura, a proximidade com outras áreas de colheita, e o período do corte, pois são fatores críticos para assegurar os níveis de retorno econômico e de sustentabilidade da floresta. Diante disso, a formação de blocos de colheita se

torna um grande desafio ao gestor, pois todas as restrições de colheita devem ser cumpridas, objetivando a maximização de uma função de lucro, receita ou produção volumétrica, vinculada a restrições de demanda.

Entretanto, para ROBERT (2012) a colheita florestal não deve ser gerida apenas com foco em aumento de produtividade e redução de custos, e sim se atentar também às metas de aspectos sociais e ambientais usados para o dimensionamento da mesma, buscando melhorias em diversas questões que contribuam para com a continuidade da atividade florestal em todo o seu contexto.

3.4 Pesquisa Operacional

Até aqui, pôde-se ver a quantidade de fatores que devem ser considerados no planejamento das atividades florestais, desde as atividades silviculturais até a entrega da madeira ao consumidor final. Como esses fatores envolvem o uso dos recursos naturais, humanos e financeiros, e ainda deseje-se obter o melhor cenário englobando esses três fatores para uma tomada de decisão, a Pesquisa Operacional se torna uma ferramenta essencial ao planejamento florestal.

Segundo TAHA (1994), citado por ARCE (2000), a Pesquisa Operacional visa determinar o melhor caminho até o “ótimo” de um problema de decisão com restrição de recursos limitados. O termo Pesquisa Operacional (PO) está associado com a aplicação de técnicas matemáticas a problemas de decisão representados e analisados por meio de modelos matemáticos.

ARCE (2000) explica que, embora os modelos matemáticos representem a base para a Pesquisa Operacional, o principal objetivo da ferramenta consiste em resolver um problema, e não construir e resolver modelos matemáticos, mesmo estes fazendo parte da síntese de uma PO.

Para melhor esclarecimento, CARDOSO (2011) explica as fases de desenvolvimento da Pesquisa Operacional: após a identificação do problema, vem a fase de formulação, que consiste na estruturação dos dados e das

informações disponíveis; a próxima fase é a de modelagem, que se concentra na construção do modelo que é uma representação simplificada do sistema, em geral descrito por um conjunto de equações e desigualdades matemáticas; a solução é obtida através de um método que pode ser um procedimento matemático ou algoritmo para alcançar o resultado; a avaliação consiste na validação do modelo, em que podem ser feitos ajustes; a decisão é a escolha e operacionalização da solução encontrada. Toda essa estrutura pode ser vista na FIGURA 2 abaixo:

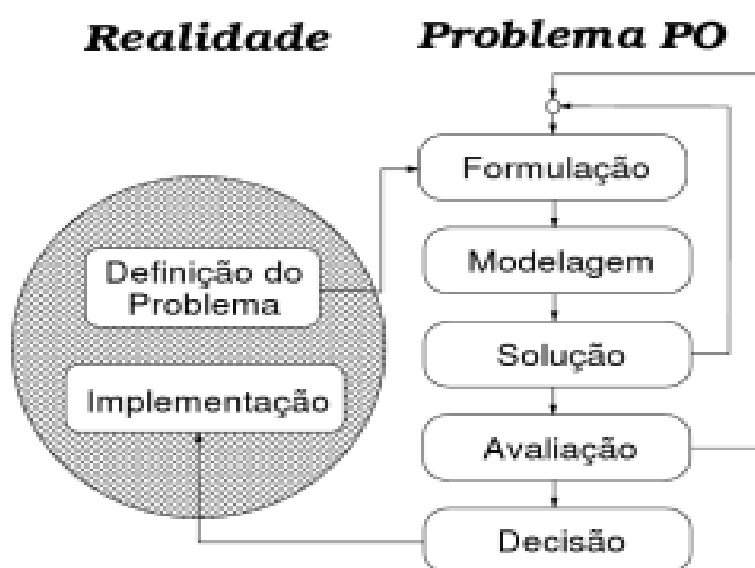


FIGURA 2 - FASES DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA OPERACIONAL

FONTE: CARDOSO (2011)

JASKIU (2015) resume que a Pesquisa Operacional, de modo geral, tem por objetivo encontrar soluções ótimas ou próximas do ótimo para problemas complexos de tomada de decisão.

Dentro da Pesquisa Operacional existem vários métodos de busca de soluções, como a Programação Linear, a Programação Não-Linear, Programação Dinâmica, Programação Inteira, Otimização Global, entre outras. Entretanto, há uma delas que pode ser considerada como uma base para todas as outras: A Programação Linear (PL).

3.4.1 Programação Linear

A Programação Linear (PL) tem sido classificada entre os mais importantes avanços científicos do século XX (HILLIER E LIEBERMAN, 2013). Sua aparição se deu no final da década de 1940 e desde então continua sendo o método mais empregado e conhecido dentro da Pesquisa Operacional. Isso se deve, de acordo com MURTY (2003), ao fato da PL ter sua aplicação nas mais variadas áreas e a vantagem de ser o modelo de otimização mais simples para se construir e se entender. Além disso, ARCE (1997) cita que um fator importante que contribuiu para com a ampla difusão do método seria a disponibilidade de programas de computador muito eficientes que possibilitam a resolução de extensos e complexos problemas.

HILLIER E LIEBERMAN (2013), citados por JASKIU (2015), explicam que a palavra “Programação” se refere a planejamento, e não à programação de computador; e a palavra “Linear” se refere que todas as funções matemáticas nesse modelo são necessariamente funções lineares.

A Programação Linear pode ser definida como um método matemático que aloca recursos limitados em atividades concorrentes de maneira otimizada (BUONGIORNO E GILLESS, 2003).

AUGUSTYNCZIK (2014) descreve que a otimização se refere a dois pontos: 1 – a maximização de parâmetros, como lucro, vendas, uso efetivo de uma área, nível de produção, enfim, tudo aquilo que se deseja ser o maior possível dentro do problema; e 2 - a minimização, como custo de produção, distâncias a serem percorridas, emprego de mão-de-obra, ou seja, tudo aquilo que é visto de forma negativa em grande quantidade para o problema.

Além dos dois pontos citados acima, DANTZIG (1998), citado por AUGUSTYNCZIK (2014), identifica algumas premissas de um problema de programação linear:

“1) Proporcionalidade: as quantidades de recurso utilizadas são sempre proporcionais ao nível da atividade. Se o gestor deseja dobrar o nível de atividade, é necessário dobrar a utilização do recurso.

2) Não negatividade: enquanto qualquer múltiplo positivo de uma atividade for possível, quantidades negativas da atividade não são possíveis. As atividades desenvolvidas não podem ser feitas em quantidades negativas, por exemplo, não se pode produzir um produto em quantidades negativas.

3) Aditividade: a quantidade total de cada atividade especificada pelo sistema deve ser igual à soma total do fluxo de recursos que entram na atividade menos a soma total dos recursos que saem da atividade.

4) Função objetivo linear: a função objetivo é um dos itens do sistema, e em geral mede o retorno obtido. A contribuição de cada atividade para o retorno total é a quantidade do recurso considerado na função objetivo que é adicionado ou retirado pela atividade. Assim, se o objetivo é maximizar os lucros, as atividades que utilizam dinheiro contribuem negativamente e as atividades que produzem dinheiro contribuem positivamente para o lucro total.”

JASKIU (2015) demonstra a forma padrão de problemas de programação linear em notação matricial apresentada por MURTY (2013):

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar ou Minimizar} & z(x) = c^T x + \alpha \\ \text{sujeito à:} & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{array}$$

Onde $z(x)$ é a função objetivo, c^T é um vetor com os coeficientes da função objetivo (o T designa a transposição do vetor), x é um vetor com as variáveis de decisão, α é um valor constante, A é a matriz com os coeficientes das restrições e b é um vetor com valores constantes para as restrições.

O método analítico mais conhecido para a resolução de problemas de Programação Linear é o Método ou Algoritmo Simplex. Foi em 1949 que o matemático George B. Dantzig desenvolveu esse algoritmo, capaz de localizar a solução ótima em problemas com inúmeras soluções factíveis de maneira muito eficiente. Um algoritmo é uma sequência lógica e ordenada de operações ou passos que devem ser processados visando atingir um determinado objetivo (ARCE, 2014).

O Método Simplex é um processo que interage com todas as variáveis, encontrando uma solução básica factível que satisfaça as restrições e a condição de não negatividade, e em seguida busca uma solução em que se obtém um melhor valor para a função objetivo. A solução ótima é atingida quando o processo não encontra nenhuma outra solução melhor que a anterior.

Entre 1964 e 1977, diversos modelos de programação linear e programação inteira foram propostos com intuito de otimizar o planejamento florestal. Entretanto, fez-se uma compilação desses vários modelos e, em

1977, Johnson e Scheurmann denominaram dois modelos genéricos, dos quais todos modelos planejamento florestal otimizado seriam variantes. Esses dois modelos são o Modelo Tipo I e o Modelo Tipo II (ARCE, 2014).

O Modelo Tipo I, gera um conjunto de alternativas de manejo para cada talhão e, uma vez que a alternativa de manejo dada tenha sido escolhida para a respectiva unidade, esta permanecerá sobre tal intervenção durante o horizonte de planejamento considerado, o que permite maior identidade dos talhões. Já no Modelo Tipo II, as regras de alocação (agrupamento e partição) das unidades de manejo quase sempre resultam na geração de um menor número de alternativas de manejo ou variáveis para o mesmo problema, resultando, em perdas de identidades dos talhões em função das regras de alocação (AUGUSTYNCZIK, 2014). A diferença fundamental entre ambos os modelos são as principais variáveis de decisão (ARCE, 2014):

1) Variável de decisão principal do Modelo Tipo I:

X_{ij} = número de hectares do talhão i a serem cortados e plantados no ano j ;

2) Variável de decisão principal do Modelo Tipo II:

X_{ij} = número de hectares da idade j a serem cortados e plantados no ano i ;

Onde i e j são subscritos inteiros variando entre 1 e o número máximo de talhões, idades ou anos do horizonte de planejamento.

Ambos os modelos são utilizados e tem suas vantagens. Entretanto quando são consideradas questões espaciais no modelo de planejamento, o Modelo Tipo I é mais adequado, pois mantém a integridade espacial do talhão ao longo do horizonte de planejamento (AUGUSTYNCZIK, 2014). Basta apenas uma simples identificação de classes de sítio diferentes para cada talhão que se faz necessário a utilização do Modelo Tipo I, ao contrário do Modelo Tipo II que requer a utilização de uma única tabela de produção para todos talhões (ARCE, 2014).

De acordo com KANGAS et. al. (2008), muitos problemas de programação linear apresentam variáveis que tem valores inteiros e valores contínuos. Esses problemas são chamados de problemas de Programação

Linear Inteira Mista (PLIM). Existe um caso especial de variáveis inteiras que são as variáveis binárias, em que são permitidas somente a variação de valores binários (0 e 1). Existem dois métodos bem conhecidos de resolver os problemas de PLIM, que seriam o Algoritmo *Branch-and-Bound* e o Método de Corte, e ambos exploram o Algoritmo Simplex.

3.4.2 Programação Linear Inteira e Programação Linear Inteira Mista

HILLIER e LIEBERMANN (2013) explicam que a Programação Linear Inteira trata de modelos de Programação Linear que possuem uma restrição adicional em que as variáveis devem possuir valores inteiros dentro de um problema. Mas se apenas algumas variáveis possuírem a restrição de valores inteiros, o modelo é então denominado de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

O primeiro método para resolver problemas de PLIM foi proposto em 1958 por Gomory. O método se baseava em planos de corte, adicionando restrições subjacentes ao programa linear, cortando as soluções não inteiras. Dois anos depois, em 1960, Land e Dong propuseram o método mais eficiente de se resolver problemas de PLIM: o Algoritmo *Branch-and-Bound*.

O Algoritmo *Branch-and-Bound* se baseia em ramificar o problema original em subproblemas cada vez menores até que sejam solucionados. Assim, ocorre uma avaliação progressiva na resolução dos problemas lineares subjacentes. Isso acontece porque o problema original é muito difícil de ser resolvido diretamente, e então a conquista da resolução é feita parcialmente, limitando-se à qualidade da solução, se esta pode ser a melhor no subconjunto, e descartando as soluções seguintes que possam não conter uma solução ótima para o problema original (HILLIER e LIEBERMAN, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

Os dados utilizados para a realização deste trabalho são provenientes de uma porcentagem do povoamento de *Eucalyptus spp.* que pertencem à empresa WestRock.

A WestRock é uma empresa internacional de embalagens que possui várias sedes pelo mundo. No Brasil, a WestRock (antiga Rigesa) atua desde 1942 com cinco fábricas situadas em três estados: Ceará (1), São Paulo (2) e Santa Catarina (2). A Fábrica de Papel e a Divisão Florestal da WestRock no Brasil situam-se no município de Três Barras, em SC. A Divisão Florestal está em atividade desde 1956 e é responsável pelo fornecimento de madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* para a fabricação do papel na Fábrica de Papel de Três Barras (FPTB), provenientes de suas regiões, constituídas por várias fazendas, onde 100% das florestas são certificadas pelo CERFLOR.

Os povoamentos deste estudo pertencem à 40 fazendas distribuídas em 7 municípios da região do Planalto Norte Catarinense e em 4 municípios da região sul do Estado do Paraná, correspondendo a uma área de aproximadamente 4.461 hectares, como podem ser vistos na FIGURA 3.

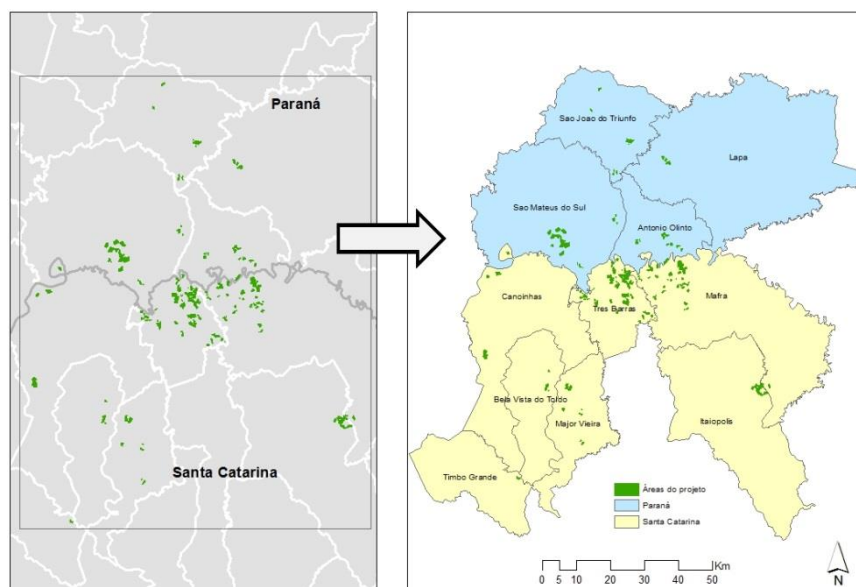


FIGURA 3 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

FONTE: WESTROCK (2016)

As áreas pertencentes a esses municípios estão inseridas na Região Geomorfológica Patamar Oriental da Bacia do Paraná. O relevo da região corresponde a uma superfície regular, quase plana (WESTROCK, 2015).

Com relação à hidrologia, grande parte das áreas são drenadas pelo Rio Negro, importante afluente da margem esquerda do Rio Iguaçu. Dos afluentes do Rio Negro, as áreas de manejo exercem influência sobre os rios Canoinhas, São João e Butiá; dos afluentes do Rio Iguaçu são os rios Negro, Paciência, Timbó, Potinga e Claro (WESTROCK, 2015).

Os solos que ocorrem com maior abrangência nas regiões de plantio levantados pela empresa são: Latossolo Vermelho-Escuro álico; Terra Vermelha-Brunada Estruturada álica; Cambissolo álico; e Gleissolo Pouco Húmico distrófico.

Segundo a classificação climática de Köppen, as áreas de influência da WestRock estão situadas predominantemente no clima Cfb – Clima Temperado, com verão ameno, chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca, com precipitação anual de 1.100 a 2.000 mm. Os verões são frescos e no inverno há frequentes geadas severas, em um período médio de ocorrência de 10 a 25 dias por ano.

As áreas de plantio comercial pertencem à região fitogeográfica da Floresta Ombrófila Mista, caracterizada pela ocorrência da espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze 1898.

4.2 O Problema

Em 2015, foi criado dentro da Divisão Florestal da WestRock o Departamento de Planejamento Florestal. Este departamento tem como função gerar informações para dar suporte às tomadas de decisões estratégicas, táticas e operacionais da Empresa.

Os povoamentos florestais da empresa já possuem um planejamento estratégico de longo prazo estabelecido com o auxílio do programa LP Solver. Entretanto, o planejamento tático da colheita costuma ser realizado com

projeção de um ano sem o auxílio de programas otimizadores. Isso acaba limitando a visão dos planejadores para com os anos seguintes, prejudicando assim a elaboração de um planejamento mais preventivo quanto às estratégias de produção e logística, principalmente com relação à problemas advindos da distribuição espacial heterogênea em relação às idades e espécies.

Diante disso, fora proposto a elaboração de um planejamento tático otimizado da colheita florestal com um horizonte de planejamento de cinco anos para as áreas de plantios de *Eucalyptus spp.*, pois muito dessas áreas não vêm apresentando um bom crescimento devido ao sítio em que se encontram e outras já estão consideradas “áreas velhas”, precisando assim de uma readequação dos respectivos talhões, renovando e melhorando a qualidade das florestas como um todo.

A prognose da produção foi feita por meio de uma tabela de produção fornecida pela empresa, para cada talhão de cada região, em função do sítio, tipo de material genético, espécie e idade, considerando períodos anuais e apenas um tipo de sortimento: toras para celulose. Essas toras serão destinadas à Fábrica de Papel de Três Barras, sendo estimada pelo planejamento estratégico uma produção anual sustentável das florestas de *Eucalyptus spp.* em toneladas representadas para os próximos 5 anos na TABELA 2.

TABELA 2 – PRODUÇÃO ANUAL SUSTENTÁVEL DE MADEIRA DE *EUCALYPTUS SPP.* NOS 5 ANOS DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO

Anos do Horizonte de Planejamento	Produção Anual de Madeira* (tonelada)
2017	300.000
2018	300.000
2019	300.000
2020	180.000
2021	180.000

* Produção em tonelada descontando 12% do peso referente à umidade da madeira

FONTE: O AUTOR (2016)

Ao todo foram selecionados 364 talhões pertencentes a 40 fazendas, com uma classe de idade atual variando de 2 a 34 anos, que podem ser vistas

na TABELA 3. Para uma possível otimização de dispersão, foram calculadas as distâncias lineares entre cada região por meio de coordenadas geográficas em UTM.

TABELA 3 - ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DE *EUCALYPTUS SPP.* DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA

Classes de idade (anos)	Nº de Talhões	Área (ha)	%
[0-6)	183	1.709,3	38,32
[6-12)	167	2.699,21	60,51
[12-18)	3	7,33	0,16
[18-24)	5	40,17	0,90
[24-30)	5	4,57	0,10
[30-36)	1	0,3	0,01
Total	364	4.460,88	100,00

FONTE: O AUTOR (2016)

As espécies do gênero *Eucalyptus* que serão colhidas nesses cinco anos planejados são *Eucalyptus dunnii* Maiden, *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) e *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage. Para todas essas espécies, a idade de corte estabelecida pela empresa é de 7 anos.

As metas anuais de produção foram estabelecidas conforme a sustentabilidade da empresa quanto aos seus recursos para o atendimento parcial da demanda pela matéria-prima da Fábrica de Papel de Três Barras. Para a diferença de consumo é realizada a compra direta do mercado.

4.3 O Modelo de Otimização

A base do modelo de otimização utilizada é o Modelo Tipo I, proposto por Johnson e Scheurmann. Foram testados quatro modelos diferentes, em que três tiveram função objetivo de maximização e um de minimização. Em todos os modelos foram aplicadas restrições básicas, como idade mínima de

corte e produção mínima anual, e outras restrições específicas para cada formulação matemática.

A TABELA 4 apresenta as variáveis, constantes e índices usados nos modelos matemáticos:

TABELA 4 - VARIÁVEIS, CONSTANTES E ÍNDICES DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Variável, Constante ou Índice	Descrição
Vol	Volume da produção em toneladas
i	Talhão i
I	Número de talhões
J	Ano do horizonte de planejamento
J	Duração do horizonte de planejamento
X_{ij}	Variável binária que representa o corte (1) ou não (0) do talhão i no ano j
$Y_{i_1 i_2 j}$	Variável binária que indica se no ano j ambos os talhões i_1 e i_2 são cortados (1) ou se ao menos um deles não é cortado (0)
Vol_{ij}	Volume do talhão i no ano j em toneladas
A_i	Área do talhão i em hectares
P_{ij}	Produção do talhão i no ano j em ton/há
$Vest_j$	Volume estimado de madeira no ano j em toneladas
G_i	Idade do talhão i no ano zero
G_{min}	Idade mínima para o corte
$Di_1 i_2$	Distância entre os centroides dos talhões i_1 e i_2

FONTE: O AUTOR (2016)

4.3.1 Função Objetivo

A primeira função objetivo foi modelada para maximizar a produção de madeira em toneladas durante o horizonte de planejamento estabelecido. Essa função objetivo é caracterizada pela seguinte equação (1):

$$Max Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [X_{ij} A_i P_{ij}] \quad (1)$$

A segunda função objetivo foi modelada para minimizar a dispersão da colheita durante os anos do horizonte de planejamento estabelecido. A equação que expressa essa função objetivo de minimização é apresentada na equação (2) abaixo:

$$Min Z = \sum_{i_1=1}^I \sum_{i_2 \neq i_1=1}^I \sum_{j=1}^J (Y_{i_1 i_2 j} * D_{i_1 i_2}) \quad (2)$$

4.3.2 Restrições

Todos os modelos apresentaram as seguintes restrições básicas com suas respectivas equações (3 e 4):

- Respeitar a idade mínima de corte:

$$X_{ij} (G_i + j - 1) \geq X_{ij} G_{min} ; \quad \forall i \forall j \quad (3)$$

- Atender a estimativa de produção anual sustentável da floresta:

$$\sum_{i=1}^I [X_{ij} A_i P_{ij}] \geq Vestj ; \quad \forall j \quad (4)$$

Como restrição específica do primeiro e do segundo modelo, tem-se a restrição de equilíbrio da produção anual durante o horizonte de planejamento, apresentada nas equações (5a e 5b). Estas equações devem considerar que a produção sustentável definida pela empresa para os anos 1, 2 e 3, de 300.000 t/ano, é diferente da produção sustentável definida para os anos 4 e 5, de 180.000 t/ano. Além destas produções garantidas pela equação (4), foi definida uma tolerância de $\pm 25\%$ para os volumes totais produzidos em anos consecutivos.

$$\sum_{i=1}^I [X_{ij} A_i P_{ij}] \geq 0,75 \sum_{i=1}^I [X_{ij-1} A_i P_{ij-1}] ; \quad j = 2, 3, 5 \quad (5a)$$

$$\sum_{i=1}^I [X_{ij} A_i P_{ij}] \leq 1,25 \sum_{i=1}^I [X_{ij-1} A_i P_{ij-1}] ; \quad j = 2, 3, 5 \quad (5b)$$

Outra restrição específica aplicada no segundo modelo é a de equilíbrio da distância média das áreas de colheita até a fábrica (consumidor final). As equações 6a e 6b representam essa restrição, considerando uma tolerância de $\pm 10\%$ entre as distâncias de anos sucessivos. As equações 6a e 6b não levam em consideração os volumes transportados anualmente pois a intenção é equilibrar as distâncias de estradas e serem anualmente conservadas com as operações habituais de manutenção de estradas.

$$\sum_{i_1=1}^I \sum_{i_2 \neq i_1}^I (Y_{i_1 i_2 j} * D_{i_1 i_2}) \geq 0,9 \sum_{i_1=1}^I \sum_{i_2 \neq i_1}^I (Y_{i_1 i_2 j-1} * D_{i_1 i_2}) ; \quad j = 2, 3, 4, 5 \quad (6a)$$

$$\sum_{i_1=1}^I \sum_{i_2 \neq i_1}^I (Y_{i_1 i_2 j} * D_{i_1 i_2}) \leq 1,1 \sum_{i_1=1}^I \sum_{i_2 \neq i_1}^I (Y_{i_1 i_2 j-1} * D_{i_1 i_2}) ; \quad j = 2, 3, 4, 5 \quad (6b)$$

A última restrição, imposta nos dois últimos modelos matemáticos, é a restrição da formação de blocos de colheita que devem ser cortados em um único ano do horizonte de planejamento. Esses blocos são nada mais que talhões pertencentes à mesma fazenda e que devem ser cortados no mesmo ano. A equação (7) a seguir representa essa última restrição.

$$\sum_{j=1}^J [X_{ij}] \leq 1; \forall i \quad (7)$$

4.4 Os Cenários

Foram propostos quatro cenários para o problema em questão neste trabalho.

O primeiro cenário tem como função objetivo a maximização da produção em toneladas com restrição de equilíbrio, ou seja, que a produção em toneladas seja equilibrada durante o HP. Esse cenário pode ser considerado o cenário “Testemunha” do estudo, pois avaliará a potencialidade produtiva máxima da floresta durante os cinco anos do HP. O intuito deste cenário é avaliar o potencial da floresta em fornecer à fábrica de papel uma produção constante por ano no seu máximo produtivo.

O segundo cenário tem a mesma função objetivo de maximizar a produção em toneladas e possui duas restrições: que além da produção em toneladas, a distância média até a fábrica também seja equilibrada durante o HP. Este cenário tem uma grande importância devido ao frete que, mesmo não sendo tratado neste trabalho, está diretamente relacionada ao custo do produto final que chega à fábrica.

O terceiro cenário mantém a função objetivo do primeiro e do segundo cenário, mas possui uma única e nova restrição: que cada fazenda seja colhida (inteira) em um único ano do horizonte de planejamento.

E o último e quarto cenário tem como função objetivo a minimização da dispersão da colheita com a restrição de que cada fazenda seja colhida (inteira) em um único ano do horizonte do planejamento.

Estes dois últimos cenários tem um enfoque muito mais operacional do que os outros, pois quando se opta em colher uma fazenda inteira em um mesmo ano, reduz o trabalho do retorno à fazenda, minimiza o deslocamento de maquinário, concentra as atividades de manutenção e de pessoal, além de outras vantagens gerenciais e operacionais. Porém, há uma meta anual de produção que deve ser cumprida, e resta verificar quais cenários atenderam a essa demanda no melhor cenário operacional possível.

Os cenários estão descritos de maneira mais resumida na TABELA 5 abaixo.

TABELA 5 - RESUMO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Cenário	Função Objetivo	Restrições	Horizonte de Planejamento
1	Maximização da Produção	Equilíbrio de Produção	5 anos
2	Maximização da Produção	Equilíbrio de Produção	5 anos
		Equilíbrio de Distância Média até a Fábrica	
3	Maximização da Produção	Formar blocos de colheita para serem colhidos em um único ano do HP	5 anos
4	Minimização da Dispersão da Colheita	Formar blocos de colheita para serem colhidos em um único ano do HP	5 anos

FONTE: O AUTOR (2016)

4.5 Recursos Computacionais

Os resultados da proposta deste trabalho foram obtidos por meio do software de planejamento florestal otimizado OpTimber-LP[®], desenvolvido pela empresa OpTimber Otimização e Informática Ltda. ME, licenciado gratuitamente para o Laboratório de Manejo Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O software realiza internamente chamadas ao LINGO[®], um

software de otimização matemática desenvolvido pela empresa LINDO Systems INC para otimização de problemas de programação linear e não-linear.

As tabelas de produção e as matrizes de distâncias foram elaboradas e organizadas em planilhas da *Microsoft® Excel® 2013* e posteriormente inseridas no OpTimber-LP, permitindo testar quaisquer regimes de manejo que queriam ser aplicados aos povoamentos. Deste modo, foram gerados os quatro cenários de colheita otimizados por meio do programa LINGO® e que, por sua vez, utilizou o Algoritmo *Branch-and-Bound*, dentro da Programação Linear Inteira (PLI) e da Programação Linear Inteira Mista (PLIM), como método de resolução de problemas.

Além das tabelas elaboradas em planilhas *Excel*, o mapa dos talhões, elaborado no software *ArcGIS 10.3*, também foi inserido no OpTimber-LP e com isso foi possível visualizar a distribuição espacial dos talhões em meio a cada cenário e agendamento de colheita florestal confeccionados pela otimização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Logo no início do processamento dos dados, um obstáculo foi encontrado: as soluções não foram factíveis quando imposta a idade mínima de corte de 7 anos, como é o manejo estabelecido pela empresa para as espécies do gênero *Eucalyptus*. Sendo assim, a idade mínima de corte em todos os cenários foi alterada para 6 anos, resultando assim em soluções factíveis. Todos os cenários atingiram a uma solução ótima como pode ser visto na TABELA 6 junto com os outros resultados para cada cenário.

TABELA 6 - RESULTADOS DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Cenários	Solução Ótima (toneladas)	Distância Média* (km)	Idade média de corte* (anos)	IMA* (ton ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
1	1.782.532	38,22	9	46,49
2	1.780.067	35,50	9	45,79
3	1.758.415	30,22	10	45,33
4	1.758.415	31,82	10	45,33

* Média ponderada de todos os anos do HP

FONTE: O AUTOR (2016)

Com relação à produção estimada, todos os cenários conseguiram obter um valor maior que o valor estabelecido pelo planejamento estratégico. A TABELA 7 a seguir contem os valores produzidos em cada ano do HP de cada cenário. Lembrando que a estimativa de produção sustentável não é a mesma para todos os anos, diferindo os 3 primeiros anos com 300.000 ton e os 2 últimos com 180.000 ton.

TABELA 7 - RESULTADOS DE PRODUÇÃO ANUAL PARA CADA CENÁRIO DO HP.

Cenários	Produção Anual* (toneladas)				
	2017	2018	2019	2020	2021
1	356.506	356.506	356.506	356.506	356.506
2	356.013	356.013	356.013	356.013	356.013
3	340.545	340.035	342.421	200.328	535.087
4	340.545	340.035	342.420	200.328	535.087

* Produção em tonelada descontando 12% do peso referente à umidade da madeira

FONTE: O AUTOR (2016)

O 1º cenário, como previsto, mostrou o maior valor para a função objetivo. Isso decorre do fato de não ter tido restrições que limitassem o desenvolvimento da floresta até atingir o seu ponto máximo de produção dentro do horizonte de planejamento estabelecido, desde que suprisse a demanda anual exigida. Ou seja, o otimizador agendou o corte de cada talhão individualmente diante da sua capacidade produtiva por meio das projeções de volumes de cada talhão para cada ano do HP.

É claro que o cenário 1 não é nenhum pouco cogitado em nível operacional, afinal os gastos com deslocamento de máquinas, pessoal, manutenção, frete, e até mesmo de tempo seriam altíssimos, tornando o projeto totalmente inviável. A TABELA 8 mostra o agendamento da colheita para a Fazenda Paredão - 2 e a FIGURA 4 mostra o planejamento espacial dentro do cenário em questão.

TABELA 8 - AGENDA DA FAZENDA PAREDÃO NO CENÁRIO 1

Fazenda	Talhão	Plantio	2017	2018	2019	2020	2021
2	16	2013					CR
2	28	2013					CR
2	30	2011			CR		
2	31	2011			CR		
2	41	2010			CR		
2	42	2010		CR			
2	43	2010		CR			
2	44	2010			CR		
2	45	2010		CR			
2	49	2013			CR		
2	57	2013					CR
2	58	2013					CR
2	59	2013					CR
2	60	2013					CR
2	87	2013					CR
2	131	1988					CR
2	144	2013	CR				
2	192	2013					CR
2	200	2010					CR
2	202	2010			CR		
2	203	2010		CR			
2	203	2010			CR		
2	204	2010		CR			
2	207	2010		CR			
2	209	2010			CR		
2	211	2010				CR	

FONTE: O AUTOR (2016)

CR = Corte Raso

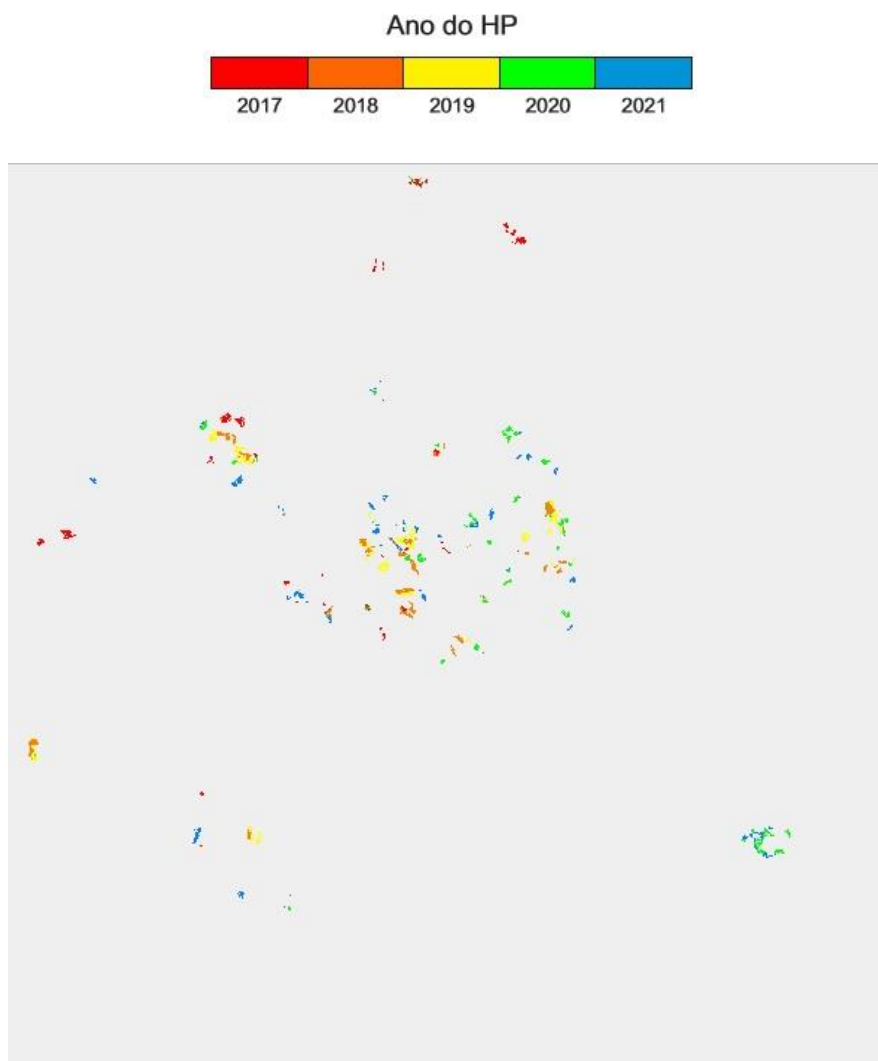


FIGURA 4 – AGENDAMENTO ESPACIAL DOS TALHÕES NO CENÁRIO 1

FONTE: O AUTOR (2016)

Como visto na TABELA 6, mesmo sem a restrição de equilíbrio quanto à distância até a fábrica, a distância média em cada ano do HP para o cenário 1 se mostrou dentro da distância média máxima desejada pela empresa, que seria de 50 km. Apenas para o ano de 2020 que a distância média foi de 52,5 km, 5% acima do limite desejável.

O 2º cenário encontrou uma solução ótima com 2.465 toneladas a menos que o cenário anterior. O motivo é que, para cumprir com a restrição de equilíbrio da distância média até a fábrica, ocorreu um agendamento que não optou necessariamente pelo corte raso no ano de melhor produção de cada talhão. A TABELA 9 mostra a mesma fazenda exemplificada no cenário 1

quanto ao seu agendamento dentro do planejamento no cenário 2. A FIGURA 5 mostra o agendamento total do cenário 2 espacialmente.

TABELA 9 - AGENDA DA FAZENDA PAREDÃO NO CENÁRIO 2

Fazenda	Talhão	Plantio	2017	2018	2019	2020	2021
2	16	2013					CR
2	28	2013					CR
2	30	2011			CR		
2	31	2011				CR	
2	41	2010				CR	
2	42	2010		CR			
2	43	2010		CR			
2	44	2010				CR	
2	45	2010				CR	
2	49	2013					CR
2	57	2013					CR
2	58	2013					CR
2	59	2013					CR
2	60	2013					CR
2	87	2013					CR
2	131	1988	CR				
2	144	2013					CR
2	192	2013					CR
2	200	2010			CR		
2	202	2010		CR			
2	203	2010			CR		
2	203	2010				CR	
2	204	2010		CR			
2	207	2010			CR		
2	209	2010				CR	
2	211	2010			CR		

FONTE: O AUTOR (2016)

CR = Corte Raso

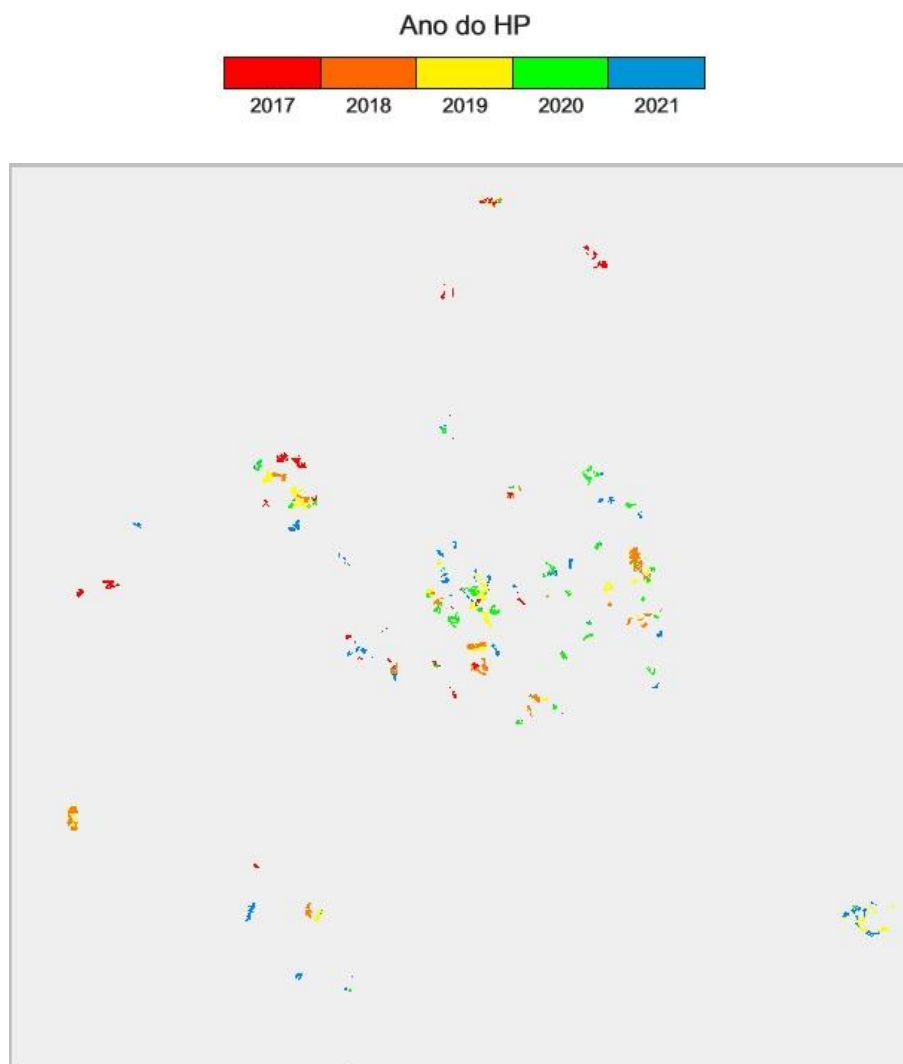


FIGURA 5 – AGENDAMENTO ESPACIAL DOS TALHÕES NO CENÁRIO 2
 FONTE: O AUTOR (2016)

O 3º e o 4º cenário tiveram um grande diferencial perante os dois cenários anteriores devido à restrição imposta a ambos. Essa restrição formou blocos de colheita constituídos de talhões que pertencem à mesma região-fazenda, ou seja, a partir do momento que se optou por um talhão de uma determinada região, todos os talhões desta região deverão ser colhidos no mesmo ano. Mesmo que muitos talhões sejam obrigatoriamente cortados sem muito incremento acumulado, os cenários permitem que a colheita se torne menos dispersa e a operacionalização muito mais viável.

Esses dois últimos cenários resultaram na mesma função objetivo mesmo ambos pertencendo a modelos matemáticos diferentes. Isso mostra que a floresta se encontra engessada no âmbito produtivo, ou seja, ela tem

poucas opções para conseguir atender a demanda de produção anual com uma baixa dispersão por ano de modo que as regiões sejam consideradas um bloco de colheita, e que os talhões tenham no mínimo 6 anos de plantio. É provável que o grande responsável por esse engessamento esteja atrelado às heterogeneidades das regiões quanto aos talhões em relação ao ano de plantio, material genético e área plantada.

A diferença no resultado final desses dois últimos cenários se deu apenas na distância média de cada ano (TABELA 6). A TABELA 10 mostra o agendamento dos cenários 3 e 4 para todas as regiões do estudo.

TABELA 10 - AGENDA DA ÁREA DE ESTUDO PARA OS CENÁRIOS 3 E 4 continua...

Cenário 3						Cenário 4				
Fazenda	2017	2018	2019	2020	2021	2017	2018	2019	2020	2021
1				CR					CR	
2					CR					CR
3					CR					CR
4			CR					CR		
5					CR					CR
7		CR					CR			
8				CR					CR	
10					CR					CR
11	CR					CR				
13			CR					CR		
15				CR					CR	
16		CR					CR			
18		CR					CR			
19	CR					CR				
21	CR					CR				
24					CR					CR
25			CR					CR		
26		CR					CR			
27	CR					CR				
28					CR					CR
31		CR					CR			
33				CR					CR	
34					CR					CR
35		CR					CR			
36					CR					CR
39					CR					CR
40	CR					CR				
45				CR					CR	
47					CR					CR

51		CR			CR
53	CR			CR	
57	CR			CR	
58	CR			CR	
60	CR			CR	
62	CR			CR	
66	CR			CR	
68	CR			CR	
69	CR			CR	
70		CR			CR
81	CR			CR	

FONTE: O AUTOR (2016)

CR = Corte Raso

Como visto, o agendamento da colheita para os dois cenários foi idêntico. Espacialmente, esse arranjo pode ser visualizado na FIGURA 6.

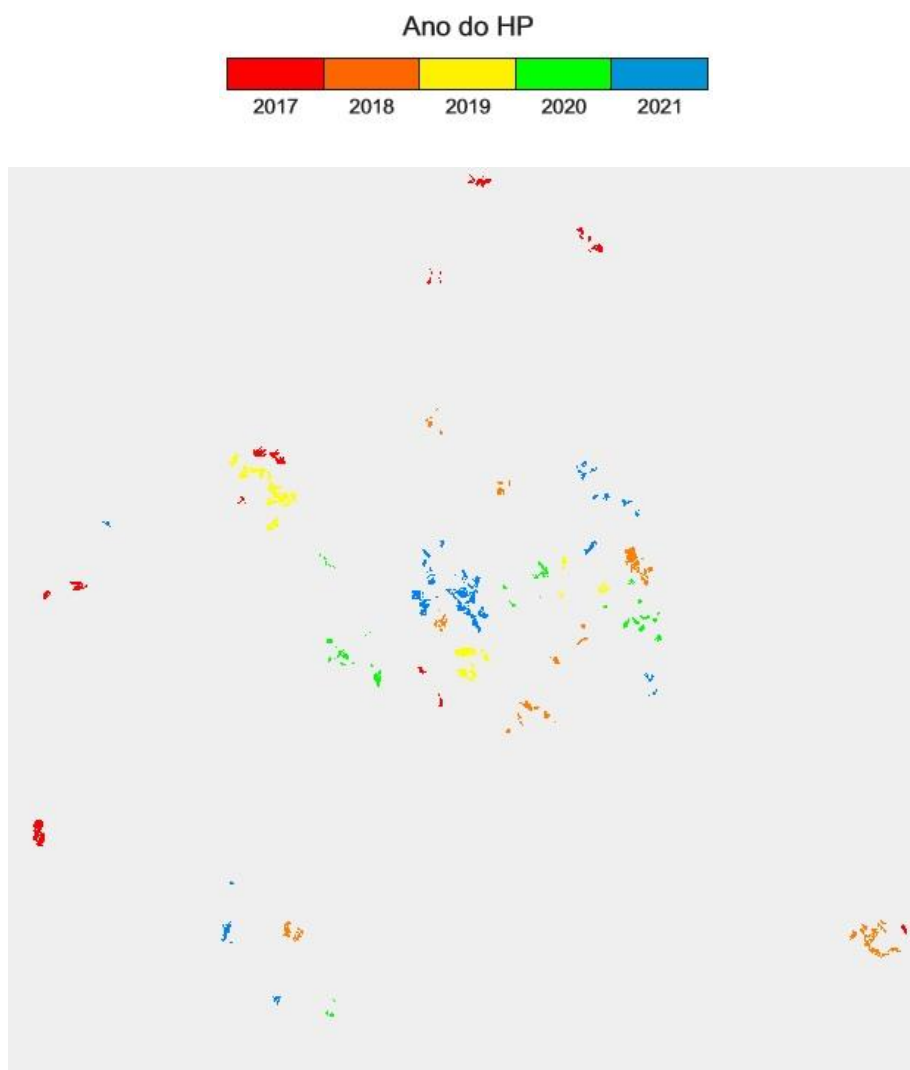
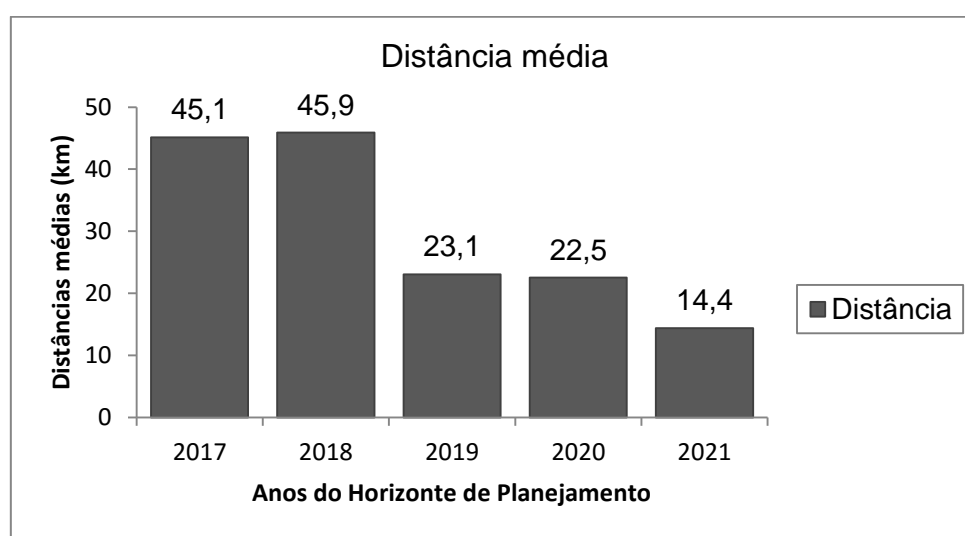


FIGURA 6 – AGENDAMENTO ESPACIAL DOS TALHÕES NO CENÁRIO 3 E 4

FONTE: O AUTOR (2016)

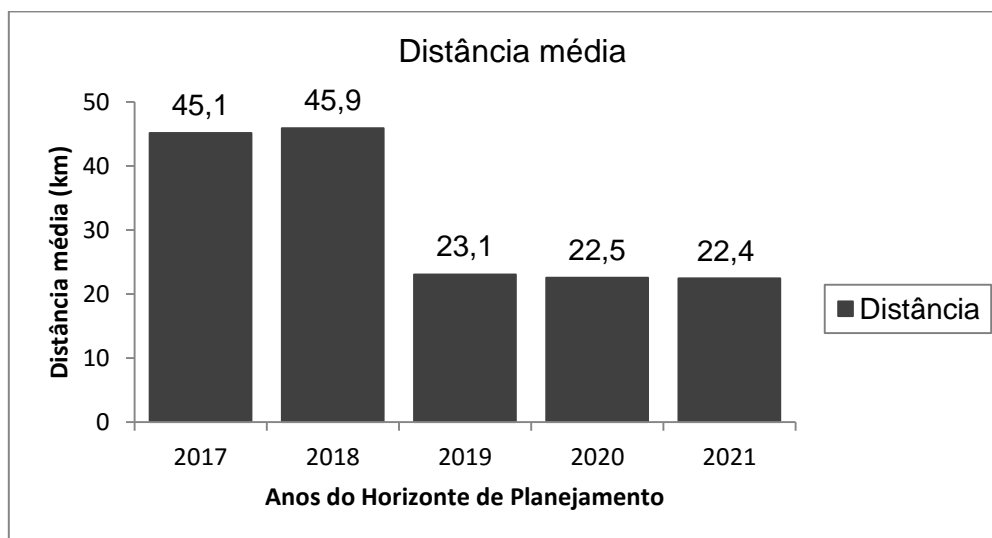
As distâncias médias entre o 3º e 4º cenário diferiram apenas para o último ano do HP. Esses resultados podem ser vistos nos GRÁFICOS 1 e 2. O motivo da diferença dessa distância média mesmo com o mesmo agendamento programado para 2021 se deve ao tipo de distância tratada entre os dois cenários: O 3º cenário leva em consideração a distância média das fazendas até a Fábrica de Papel, enquanto que o 4º cenário leva em consideração a distância entre uma fazenda a outra, no intuito de diminuir a dispersão.

GRÁFICO 1 - DISTÂNCIA MÉDIA DE TRANSPORTE PONDERADA DA COLHEITA ATÉ A FÁBRICA DE PAPEL PARA O CENÁRIO 3



FONTE: O AUTOR (2016)

GRÁFICO 2 - DISTÂNCIA MÉDIA DE TRANSPORTE PONDERADA DA COLHEITA ATÉ A FÁBRICA DE PAPEL PARA O CENÁRIO 4



FONTE: O AUTOR (2016)

6 CONCLUSÕES

Todos os cenários encontraram a solução ótima dentro de suas funções objetivo e restrições, e a otimização conseguiu superar a produção anual estimada das florestas de madeira de *Eucalyptus spp.* para todos os anos do horizonte de planejamento.

A floresta estudada se mostrou bastante heterogênea, o que não permitiu a imposição de mais restrições, pois resultara em soluções infactíveis. Outra questão que evidencia a falta de opções de planejamento da floresta seria a igualdade de quase todos os resultados obtidos nos cenários 3 e 4. A única restrição imposta aos dois cenários, que sugere o corte raso de uma determinada fazenda em um único ano do HP, foi suficiente para determinar que o único modo da floresta retornar um valor máximo de produção que atenda à demanda parcial da Fábrica de Papel, seria por meio daquele agendamento.

Pode-se considerar que a floresta está um pouco comprometida em nível de produtividade e localização, sendo sensato o seu corte raso durante os próximos 5 anos, reavaliando o manejo das áreas em questão.

Dentre todos os cenários, o 3º e o 4º foram os que melhor atenderam as necessidades operacionais e estratégicas da empresa. Isso porque ao passo em que se restringiu que um bloco de talhões, pertencentes à mesma fazenda, fosse colhida em um único ano do horizonte de planejamento, propicia uma reforma de plantio dessas fazendas, visando que daqui a 7 anos, essas apresentarão uma homogeneidade em nível de produtividade, idade, e produto, além dos benefícios que serão logo notados nos próximos 5 anos, que seriam: frente de colheita mais concentrada, e assim com menores custos com deslocamento de máquinas e pessoal, planejamento antecipado da manutenção de estradas, e base para o agendamento dos talhões de *Pinus spp.* aos arredores.

Diante de todas essas respostas e expectativas, o projeto passará a ser implantado a partir do primeiro ano do HP, 2017, sendo o cenário 3 o escolhido para ser implementado pela empresa, pois resultou em uma distância média menor em relação à FPTB.

7 RECOMENDAÇÕES

Como já comentado, este trabalho não abordou os aspectos econômicos intrínsecos no planejamento de uma colheita florestal. Este seria outro ponto fundamental e interessantíssimo para se avaliar por meio da ferramenta da otimização, pois isso pode conferir uma mudança de estratégia em prol do plano de manejo da floresta e dos resultados econômicos da empresa.

Além da inclusão dos dados econômicos, incluir os talhões dos plantios de espécies do gênero *Pinus* também resultaria em um planejamento mais abrangente e consorciado, ou seja, as frentes de *Pinus* e de *Eucalyptus* poderiam colher talhões nas mesmas fazendas, ou em fazendas próximas, simultaneamente, reduzindo o deslocamento de máquinas e pessoas e os custos atrelados a essa atividade.

REFERÊNCIAS

- ACR. **Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina 2014**. 27 de fevereiro de 2014. Lages, SC.
- ANDERSSON, D. **Approaches to Integrated Strategic/tactical forest planning**. 29f. Licentiate Thesis - Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 2005.
- ARCE, J. E. **Um Sistema de Programação do Transporte Principal de Multiprodutos Florestais visando a Minimização de Custos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- ARCE, J.E. **Um Sistema de Análise, Simulação e Otimização do Sortimento Florestal em função da Demanda por Multiprodutos e dos Custos de Transporte**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FREIDL, R. A. **Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais**. Revista. Árvore, Viçosa-MG, v.28, n.2, 2004.
- ARCE, J.E. **Apostila de Programação Linear para Fins Florestais**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. Fevereiro, 2014.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D. **Planejamento Florestal Otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2014.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. **Spatial forest Planning: A review**. Ecological Modelling, v. 188, n. 2, 2005.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D.L. **Forest Management and Planning**. Academic Press, 2009.
- BRACELPA. **Associação Brasileira de Celulose e Papel**. Eucalipto. Disponível em: < <http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/136> > 2009. Acesso em maio de 2016.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, K.J. **Decision methods for forest resource management**. Academic Press, 2003. 439p.
- CARDOSO, A. **Fundamentos da Pesquisa Operacional**. UNIFAL – MG, Fevereiro, 201.

CASTANHO F^o, E.P.C. **Eucalipto: Demanda Crescente**. Artigo Técnico. São Paulo, 2016.

CHURCH, R. L.; MURRAY A. T.; WEINTRAUB, A. **Spatial restrictions in harvest scheduling**. Forest Science, v. 45, n. 1, 1998.

DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**. Princeton University Press, New Jersey, 1998.

EISFELD, R.L. & NASCIMENTO, F.A.F.. **Mapeamento dos Plantios Florestais do Estado do Paraná – *Pinus* e *Eucalyptus***. Curitiba: Instituto de Florestas do Paraná, 2015.

FIORENTIN, L.D. **Planejamento Estratégico e regulação de povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* utilizando Programação Linear**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2016.

GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2009.

GUIMARÃES, H. S. **A logística como fator decisivo das operações de colheita de madeira e transporte florestal**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 2004.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. Porto Alegre. AMGH, 2013. 9ª edição.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Anuário Estatístico IBÁ 2014**. Brasília, 2014. 100p.

SNIF – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **As Florestas Plantadas**. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>> Acesso em maio de 2016.

JASKIU, E. **Planejamento Florestal Espacial atendendo exigências de áreas máximas e mínimas contínuas de colheita**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

KANGAS, A.; KANGAS, J.; KURTTILA, M. **Decision Support for Forest Management**. London: Springer Science & Business Media, 2008.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa, Editora UFV, 2006.

MITCHELL, S. A. **Operational Forestry Harvest Scheduling Optimization – A Mathematical Model and Solution Strategy**. Thesis - University of Auckland, Auckland, 2004.

MCDILL, M. E. **An Overview of Forest Management Planning and Information Management**. The Management of Industrial Forest Plantations. London: Springer, 2014.

ROBERT, R.C.G. **Guia prático de operações florestais na colheita de madeira**. Curitiba: Ed. Do Autor, 2012.

SCHNEIDER, P.R. **Manejo Florestal: Planejamento da Produção Florestal**. Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM. 2009.

SILVA, P.H.B.M. **Planejamento Otimizado da Colheita Florestal por blocos e talhões integrado à rede de estradas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

WALTERS, K. R. **Defining adjacency and proximity of forest stands for harvest blocking**. GIS 96 Symposium, Vancouver, Fevereiro de 1996.

WEINTRAUB, A. **New issues in forest land management from an operations research perspective**. Interfaces, v. 26, 1996.

WestRock. **Plano de Manejo Florestal**. Documento Privado. Três Barras, 2015.

ZAGONEL, R. **Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de Pinus taeda**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.